

CENTRE DE RECHERCHES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES DE L'INDUSTRIE DES FABRICATIONS METALLIQUES

Etablissement reconnu par application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947

RUE DES DRAPIERS 21 , B-1050 BRUXELLES

NOTE TECHNIQUE

CONTROLE RAPIDE DE LA DURETÉ DES MEULES

Albert DECNEUT, ingénieur

Richard AERENS, ingénieur-technicien

9

JANVIER 1973

TABLE DES MATIERES

RESUME

Le texte décrit une méthode rapide et absolument non destructive de contrôle de la dureté des meules.

La méthode est basée sur la détermination du module d'élasticité de la meule. Celui-ci est calculé à partir de la fréquence propre de vibration mesurée de façon simple à l'aide de l'appareil GRINDO-SONIC.

Grâce à l'emploi de tables de facteurs de forme, le calcul lui-même est fortement réduit par rapport à celui qu'implique le recours aux formules classiques qui d'ailleurs ne s'appliquent qu'au calcul des objets minces.

Toute information nécessaire est fournie pour stocker les facteurs de forme et les formules dans une petite calculatrice de table, ce qui permet un calcul automatique du module d'élasticité.

Finalement, des exemples concrets montrent la validité et l'intérêt de la méthode proposée.

1. INTRODUCTION

Pour mesurer la dureté des meules, un grand nombre de méthodes technologiques, encore d'application aujourd'hui, sont loin de donner entière satisfaction. Les principaux inconvénients en sont l'absence d'un critère physique de mesure et la grande dispersion des résultats.

Vu le grand nombre de paramètres qui déterminent le résultat final en rectification, il est primordial de pouvoir les caractériser avec précision. Après avoir sélectionné "la" bonne meule, l'utilisateur éprouve trop fréquemment de grosses difficultés à se procurer une meule exactement identique. Bien que les meilleurs fabricants réussissent actuellement à réaliser des séries de meules relativement homogènes et présentant des écarts de dureté inférieurs à un ou un demi grade, il y a un sérieux risque pour qu'une seconde série de meules commandées à une autre époque, présente des écarts de dureté allant parfois jusque deux grades et plus. En effet, il a été constaté à plusieurs reprises lors de contrôles de meules, que ces dernières pouvaient être classées en autant de groupes qu'il y avait eu de fournitures ! On a encore pu constater des différences de dureté parmi des meules provenant d'un même mélange, ayant subi la même cuisson, mais se distinguant par leurs dimensions.

Aussi, il devenait impérieux, tant pour le fabricant que pour l'utilisateur, de disposer d'un instrument permettant un contrôle à la fois rigoureux et non destructif. Lorsqu'il est apparu que le module d'élasticité s'avérait un excellent critère de dureté des meules (1), le C.R.I.F. à l'Université de Louvain, sous la direction du Professeur Dr. J.Peters, a développé un instrument de mesure de la fréquence propre de vibration appelé "GRINDO-SONIC" qui permet de calculer le module d'élasticité de la meule.

2. ESSAIS SONIQUES

2.1. Le GRINDO-SONIC

Le GRINDO-SONIC est un appareil spécialement conçu pour déterminer le module d'élasticité des matériaux abrasifs. Cette méthode est basée sur la mesure de la fréquence propre de vibration.

L'énergie acquise par un corps frappé au moyen d'un objet se dissipera en un phénomène vibratoire. Bien que ces vibrations soient complexes et dépendent d'une part de la nature et de la force d'impact, et d'autre part des caractéristiques du corps vibrant, on a pu établir qu'un corps qui oscille librement tend rapidement à atteindre son mode fondamental de vibration. Le GRINDO-SONIC peut, grâce à l'introduction d'une temporisation, détecter automatiquement la vibration fondamentale.

Lorsqu'une meule disque repose sur quatre supports (fig.1), placés selon deux diamètres perpendiculaires, le mode de vibration qui se manifeste effectivement lors de l'excitation par choc est une vibration perpendiculaire au plan du disque, dont l'amplitude maximum s'effectue selon deux diamètres perpendiculaires décalés de 45° par rapport aux deux diamètres support.

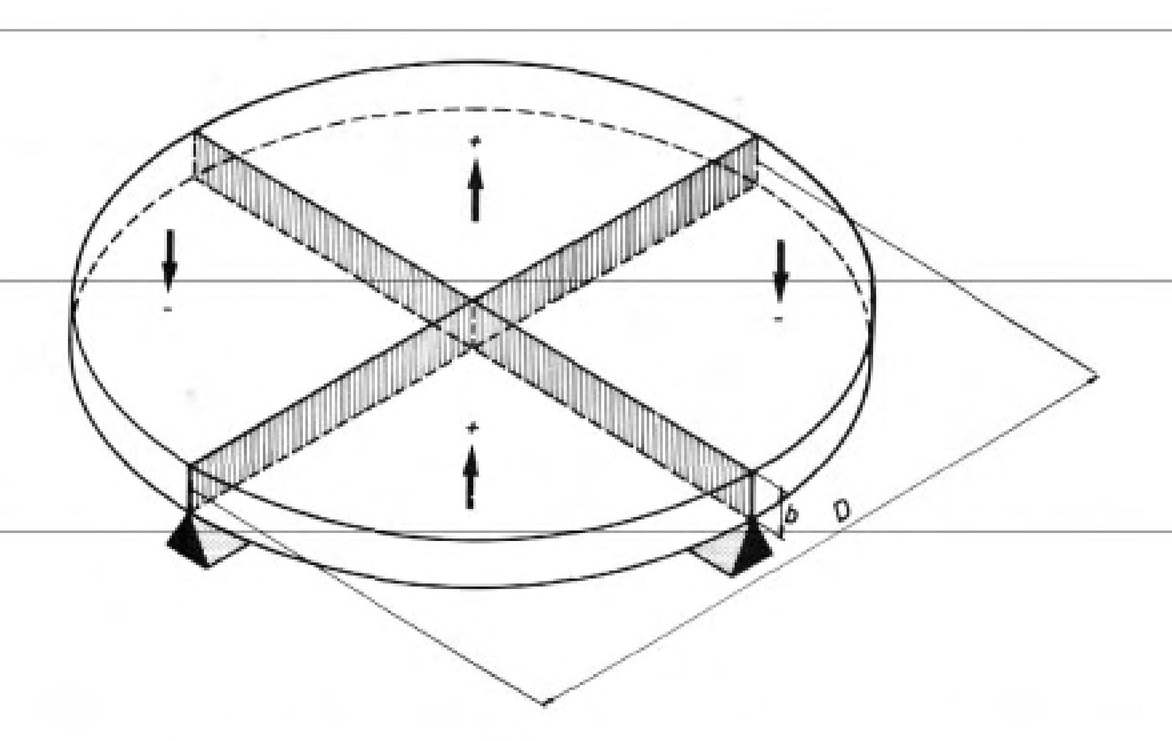


Fig.1 - Mode fondamental de vibration d'un disque

L'image d'une meule disque excitée par choc et préalablement recouverte de sable illustre fort bien cette proposition (fig.2).

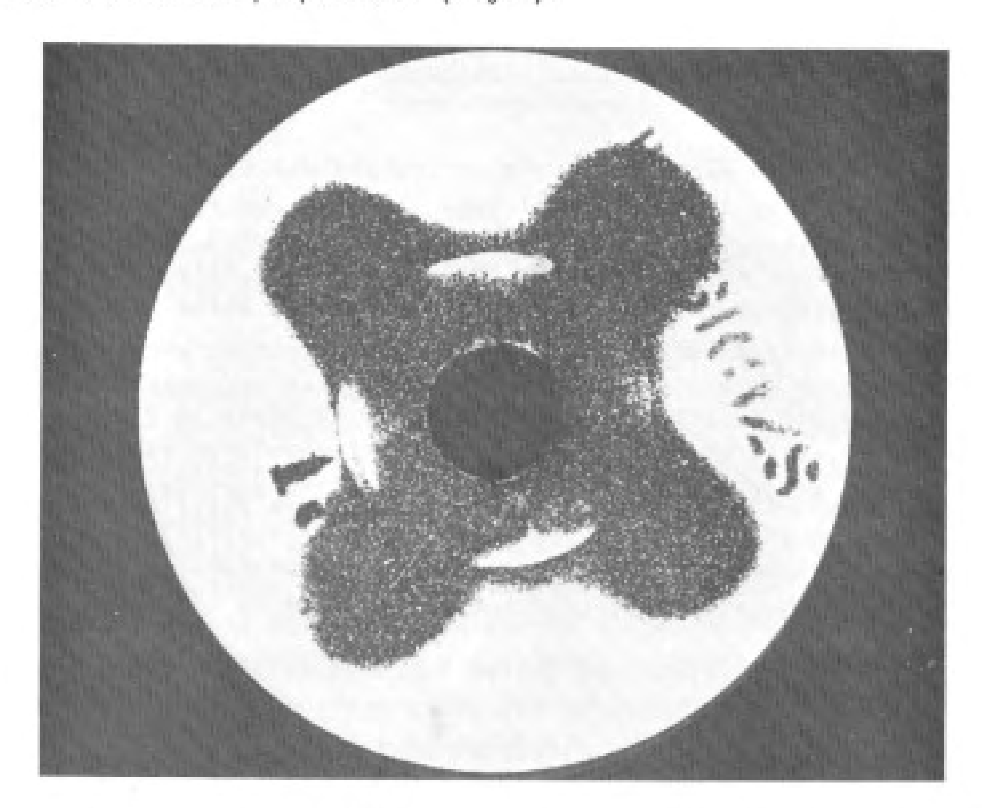


Fig.2 - Visualisation du mode de vibration fondamental

De tout ceci il résulte qu'il faut placer la meule disque sur un support possédant quatre nervures radiales perpendiculaires (fig.3). Il suffit alors d'exciter par un choc l'un des diamètres oscillants et de placer le pick-up de façon adéquate sur l'autre.
En effet, le capteur possède de par sa conception même une direction de sensibilité maximum, qui est indiquée par un point : elle doit être respectée lors de la mesure. La figure 4 montre l'application pratique de ce qui précède.

L'intensité avec laquelle la meule est frappée n'est pas critique : des résultats aussi corrects seront obtenus avec des coups étonnamment légers qu'avec des coups violents. D'habitude, on frappe le disque abrasif deux ou trois fois de suite pour s'assurer de la validité de la mesure. La dispersion de mesures correctement effectuées ne peut dépasser 1 %.

Pour contrôler l'homogénéité du matériau, les mesures seront répétées après avoir tourné le disque de 45°.

Il est intéressant de noter que l'intensité des vibrations décroît vers le centre du disque. Il s'en suit que les résultats des mesures dépendront essentiellement des propriétés du matériau extérieur, le noyau ayant relativement peu d'influence.

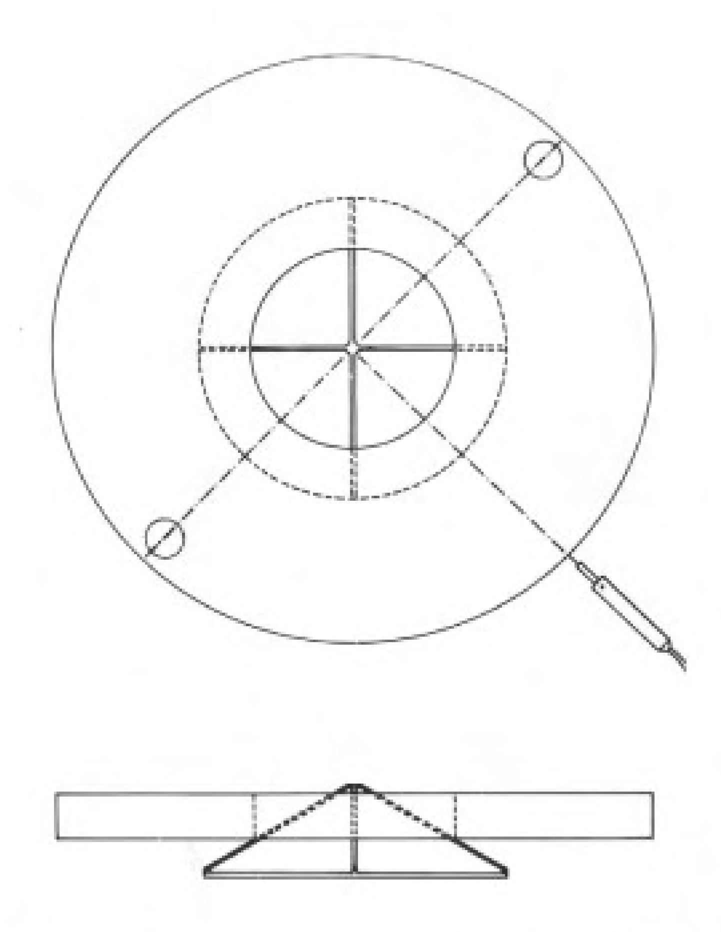


Fig.3 - Meule disque sur son support en matière plastique
Le capteur est mis en contact de la meule à mi-chemin entre deux nervures du cône



Fig.4 - Appareil de contrôle de dureté GRINDO-SONIC

2.2. Mesure de dureté de corps de formes diverses

Les disques lourds de grand diamètre peuvent être posés debout sur le sol comme le montre la figure 5.

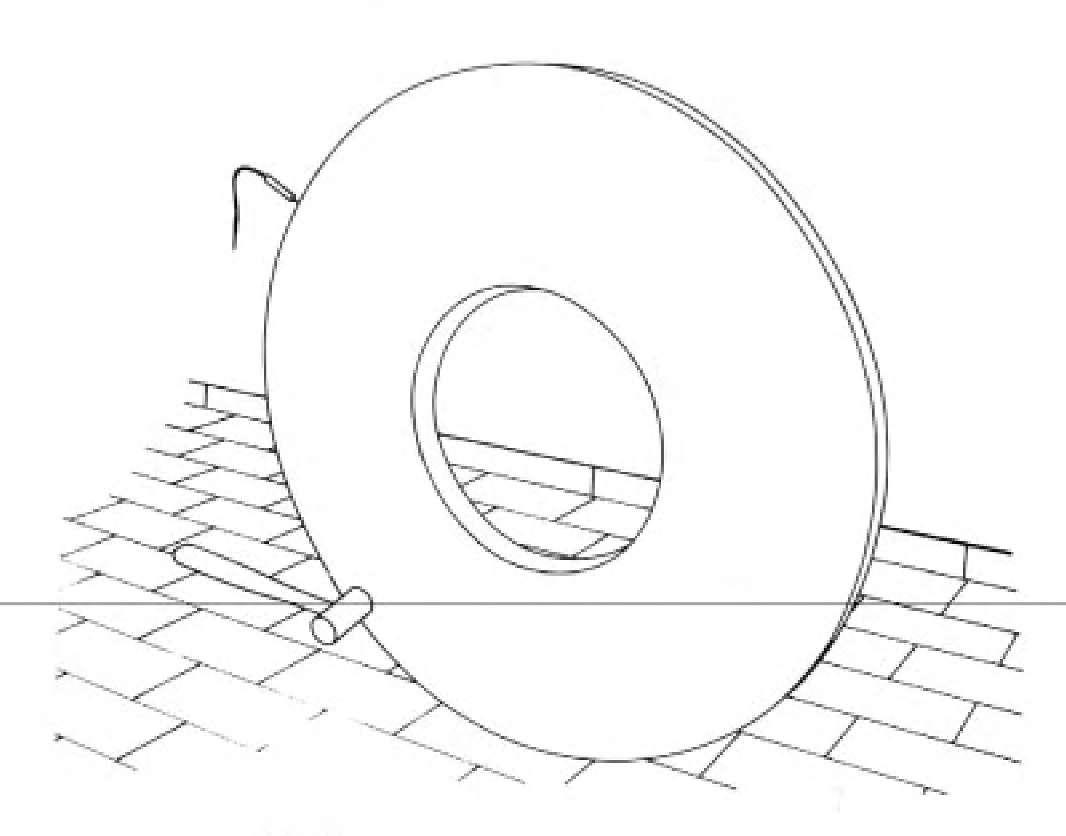


Fig.5 - Mesure de meules lourdes

Des investigations similaires sur des barreaux et d'autres formes nous renseignent sur la façon de les exciter et d'enregistrer leurs vibrations (figures 6, 7, 8).

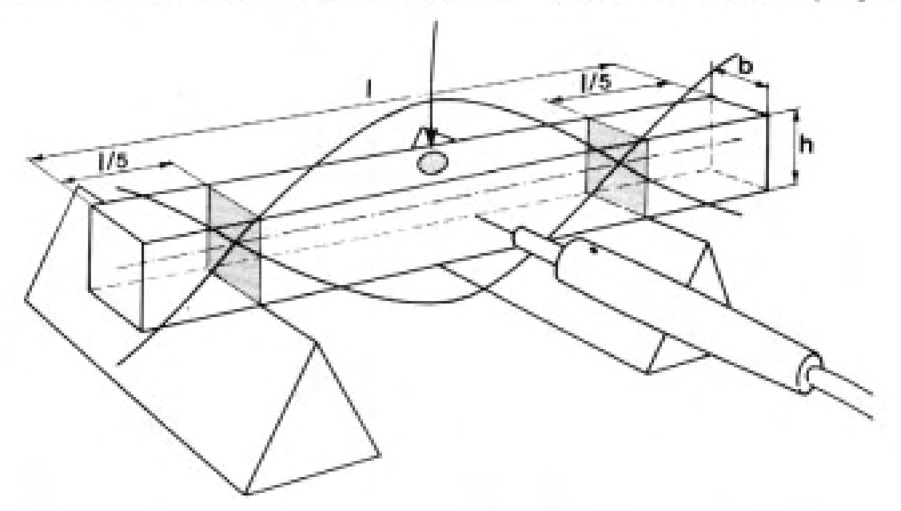


Fig.6 - Mode fondamental de vibration d'un barreau



Fig.7 - Mesure d'une meule boisseau

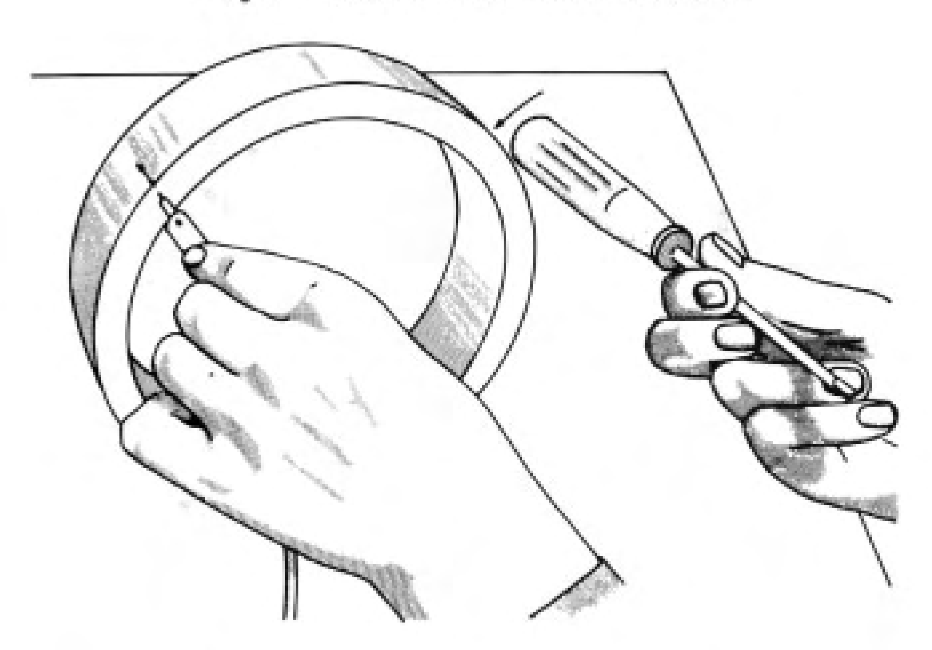


Fig.8 - Mesure d'un cylindre

Les barreaux circulaires, les segments, etc.... sont traités de la même façon que les barreaux rectangulaires.

Pour les petits objets, on utilise un microphone (figure 9)

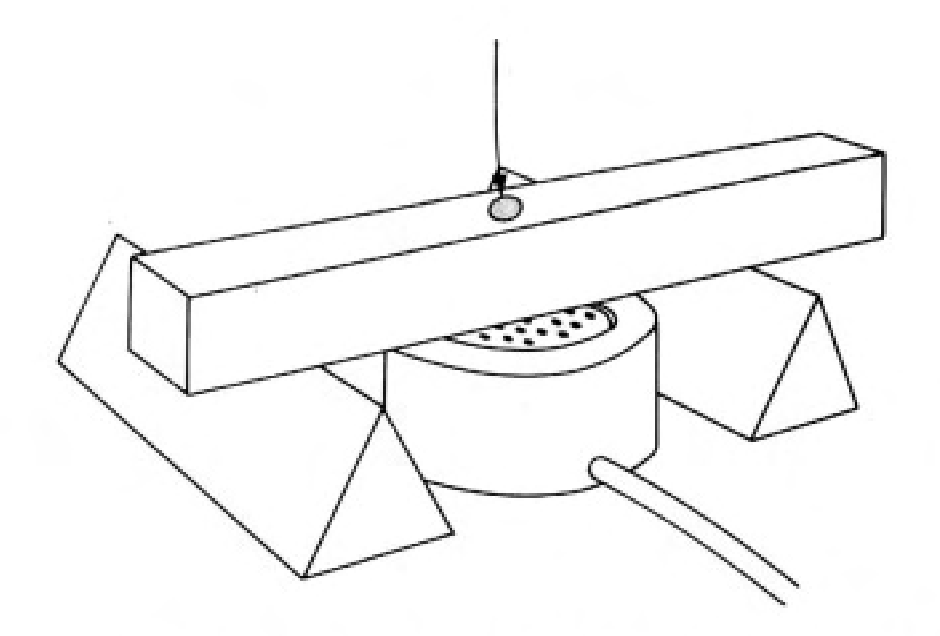


Fig.9 - La mesure d'un barreau à l'aide d'un microphone

Pour d'autres cas particuliers, nous référons au manuel d'utilisation (2).

3. EXPLOITATION DES RESULTATS

3.1. Calcul du module d'élasticité E

Le système GRINDO-SONIC permet de déterminer avec précision le module d'élasticité des disques abrasifs et des barreaux à honer (3).
Les formules à employer sont simples et les tables détaillées de facteurs de forme fournies avec l'appareil permettent de réduire les calculs au minimum. La validité de ces formules et tableaux est largement explicitée dans la référence (4).

Deux cas sont envisagés :

- si l'on connaît le poids total de la meule, on utilisera les formules et tableau que nous appellerons "M",

- si l'on connaît le poids spécifique de la meule, on utilisera les formules et tableau que nous appellerons "P" (5)

Considérons un exemple concret :

Quel est le module d'élasticité d'une meule disque de dimensions 255 x 35,6 x 127mm, de poids 2977g et dont la lecture du GRINDO-SONIC donne 939. *

Le module d'élasticité est donné par la formule (voir annexe 1) :

$$E = \frac{mM}{bR^2}$$

avec E = module d'élasticité en kiloNewton/mm^2 (1 kN/mm^2 = 100 kg/mm^2)
m = masse de la meule (g)
M = facteur de forme (**) donné par les tables (3) en fonction du rapport entre le diamètre extérieur et l'épaisseur ($\frac{D}{b}$ = 7,16) et du rapport entre l'alésage et le diamètre extérieur ($\frac{d}{D}$ = 0,5).
On obtient M = 578.10^3
b = épaisseur de la meule (mm)
R = lecture du GRINDO-SONIC

ce qui donne :

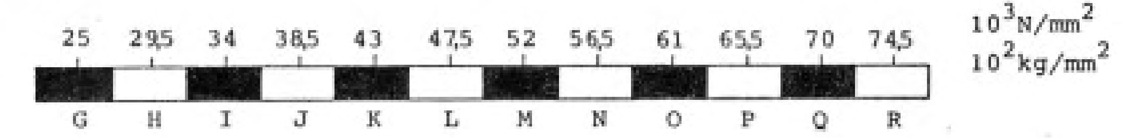
$$E = \frac{2977 \times 578 \times 10^3}{35,6 \times 939^2} \quad \text{ou} \quad E = 54,8 \text{ kN/mm}^2$$

---

* La lecture du GRINDO-SONIC est égale à 2 fois la période fondamentale en microsecondes. Il existe donc une relation simple entre la lecture et la fréquence propre $R = 2.10^6/f$, avec f en Hz.

** Les formules nécessaires pour introduire les facteurs de forme dans une calculatrice de table sont fournies en annexe 2.

Pour traduire cette valeur en dureté suivant l'échelle classique, il suffit de lire son correspondant sur l'échelle ci-dessous ; cette dernière a été établie à partir de plus de 300 mesures effectuées sur des meules à liant céramique, provenant de plusieurs fabricants.



dureté selon l'échelle classique

Selon ce tableau, la dureté de la meule dont il est question ci-dessus se situe entre M et N.

3.2. Dureté relative et contrôle des grandes séries

La facilité avec laquelle les mesures peuvent être exécutées au moyen du GRINDO-SONIC a rendu réalisable le contrôle à 100 % de séries importantes de meules.

Le contrôle de qualité ne nécessite aucun calcul, pour autant que des fiches semblables à celle reproduite ci-dessous aient été préparées pour les types de disques à tester. L'étendue des lectures GRINDO-SONIC admissible dépend des tolérances acceptées pour la module E.

TABLEAU I

type de meule : XXX
dimensions : 300 x 35 x 127

grade	module E	poids spécifique ρ (g/cm^3) 2,02	2,04	2,06
G - 1/2	22,75	1816	1825	1834
G - 1/4	23,9	1772	1780	1789
G	25	1732	1741	1749
G + 1/4	26,1	1695	1704	1712
G + 1/2 } H - 1/2	27,25	1659	1667	1675
H - 1/4	28,4	1625	1633	1641
H	29,5	1595	1602	1610
H + 1/4	30,6	1566	1573	1581
H + 1/2	31,75	1537	1545	1552
		lectures GRINDO-SONIC		

En supposant qu'une meule de ce type, de grade nominal G, avec ρ = 2,02 soit acceptée si son module E se situe entre 22,75 et 27,25 kN/mm^2 (G $\pm$ 1/2 grade), la lecture au GRINDO-SONIC devrait alors être comprise entre 1816 et 1695.

Pour répondre à des demandes plus exigeantes, il est toujours possible de s'imposer des tolérances plus serrées.

Même si des valeurs précalculées ne sont pas disponibles, il est intéressant de noter que les lectures GRINDO-SONIC différentes pour deux meules nominalement identiques peuvent être directement interprétées en termes de dureté.

TABLEAU II

grade	module E	différences de lectures au GRINDO-SONIC (%)
G	25	
		} 8,2
H	29,5	
		} 7,0
I	34	
		} 6,2
J	38,5	
		} 5,5
K	43	
		} 5,0
L	47,5	
		} 4,5
M	52	
		} 4,1
N	57,5	
		} 3,8
O	61	
		} 3,5
P	65,5	

Exemple :

Deux meules aux caractéristiques standard A46J5V donnent respectivement les lectures GRINDO-SONIC 3024 et 3176. La différence relative correspond à

$$\frac{3176 - 3024}{3100} \times 100 = 4,9\ \%$$

La différence de lecture dans la zone du grade J se situe à environ 6 %. Par conséquence, les deux meules diffèrent de 3/4 de grade environ.

Bien que le calcul du module E d'objets de forme complexe ne soit pas possible à partir de leur lecture au GRINDO-SONIC, leurs différences de dureté se détectent facilement et s'évaluent exactement de la même manière.

Lors du contrôle d'une série de meules, la comparaison des lectures au GRINDO-SONIC avec des tableaux précalculés peut être automatisée grâce à un appareil couplé avec le GRINDO-SONIC : le SELECTOR (fig.10).
Cet appareil indique par des signaux optiques et sonores si la meule testée se trouve dans, en deçà ou au delà des limites de dureté qu'on s'est imposées et que l'on a manuellement introduites dans l'appareil.

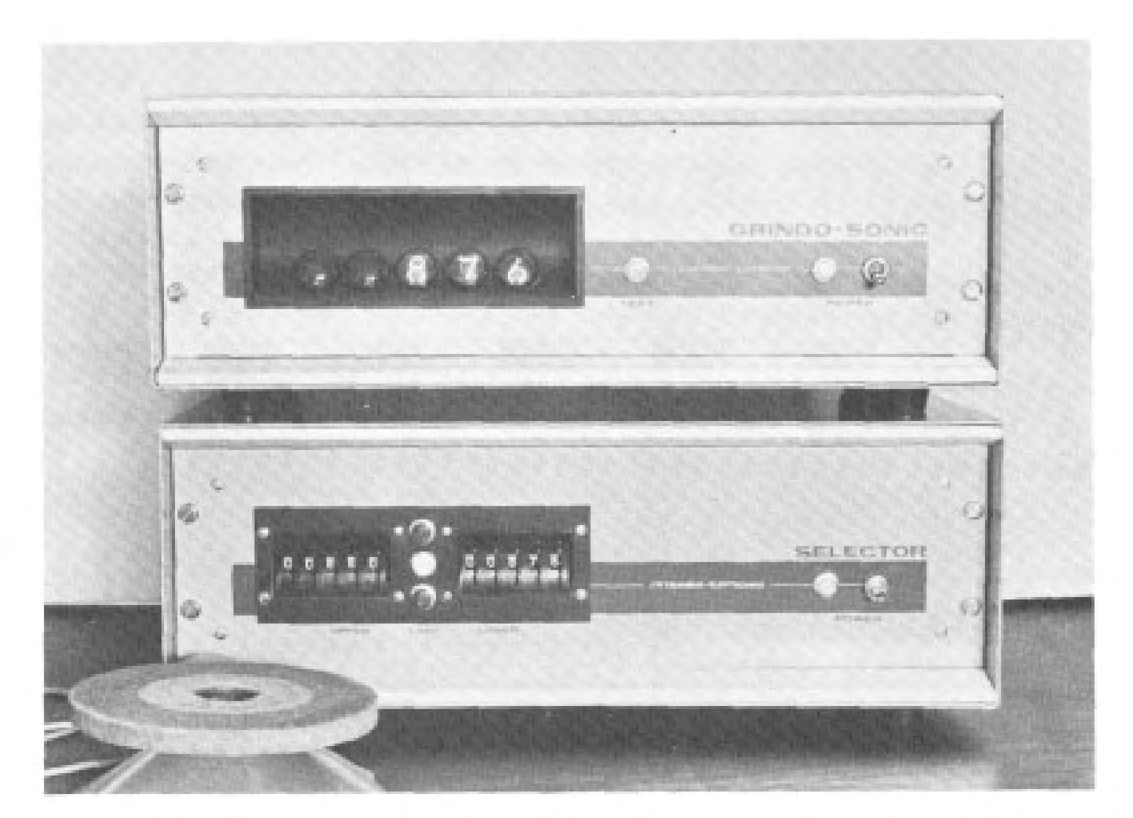


Fig.10 - Le SELECTOR, couplé avec le GRINDO-SONIC

3.3. Influence des caractéristiques de meule sur la qualité de coupe

Deux séries d'essais de rectification cylindrique en plongée de bagues de roulement (100Cr6) ont été effectuées, l'une avec une meule EK60L7VX et l'autre avec une meule EK80J7VX. Ces deux meules ont la même structure, le même type de liant et la même nature de grain. Elles ne se distinguent que par une légère différence de grosseur de grain et surtout par une différence de dureté. Celle-ci a été contrôlée à l'aide du GRINDO-SONIC.

Le module d'élasticité de la première est égale à 52,2 kN/mm^2, celui de la seconde à 45,0 kN/mm^2. L'écart de dureté (7,2 kN/mm^2) est donc inférieur à deux grades (9 kN/mm^2).

Pour chacune des meules, les caractéristiques de coupe ont été relevées et consignées dans une fiche qui donne un aperçu du fini de surface avant (R_a^w) et après étincelage (R_a^d), l'effort normal (F'_n) et l'effort tangentiel (F'_t), ainsi que la puissance nette (P'_s) et le taux d'usure (ν_s), toujours en fonction de la quantité de matériau rectifiée par unité de longueur périphérique de la meule :

$$S' = \frac{Z'}{v_s \cdot 10^3} \quad mm^2/mm$$

avec Z' = le débit de copeaux par millimètre de largeur active de meule (mm^3/s.mm)

v_s = la vitesse périphérique de la meule (m/s)

La figure 12 (meule EK60L7VX) donne les résultats pour trois vitesses de meule différentes (v_s = 30, 45 et 60 m/s) et pour trois rapports de vitesses périphériques meule - pièce ($q = v_s/v_w$ = 20, 60 et 120).

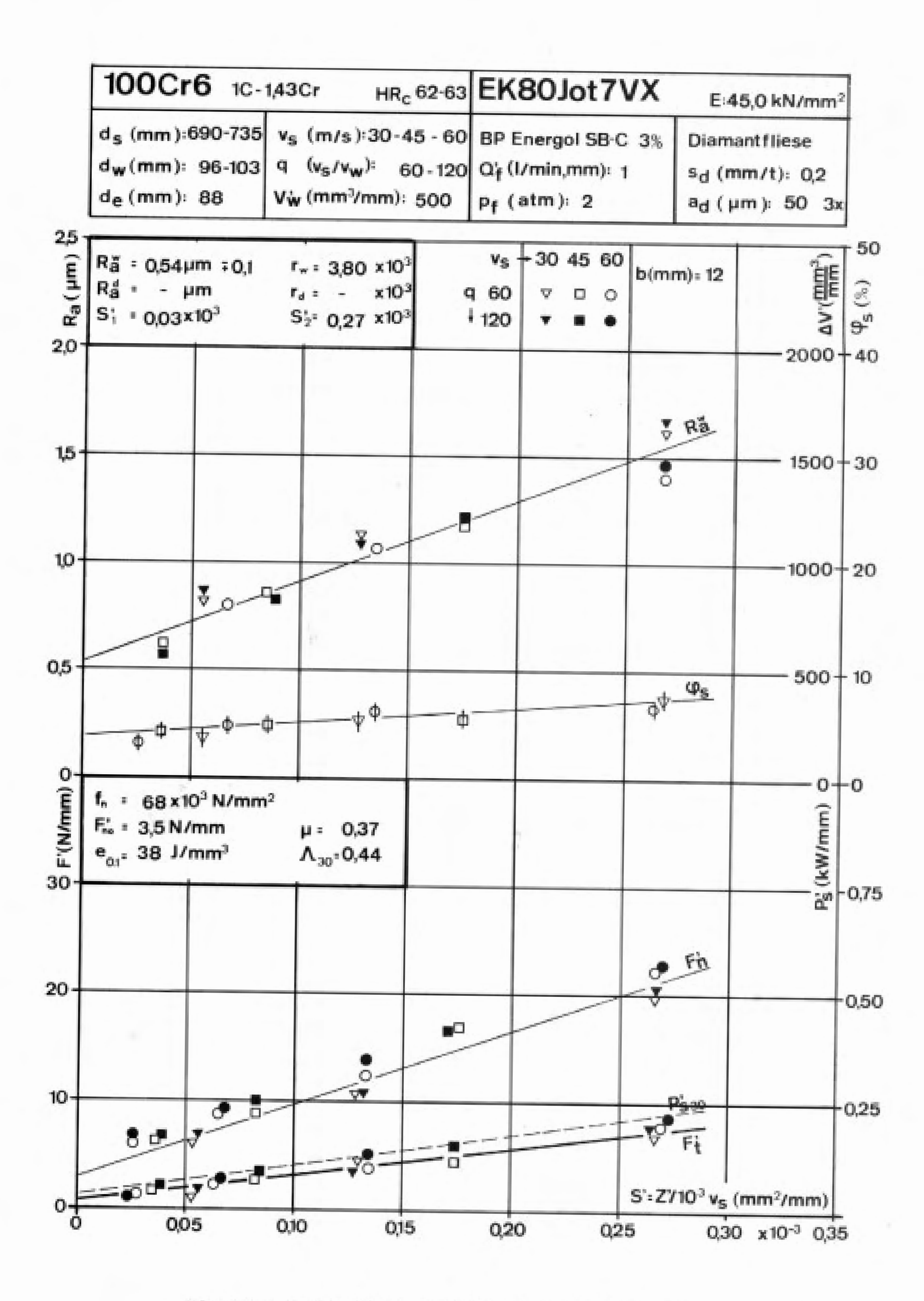


Fig.11 - Carte d'usinabilité en rectification

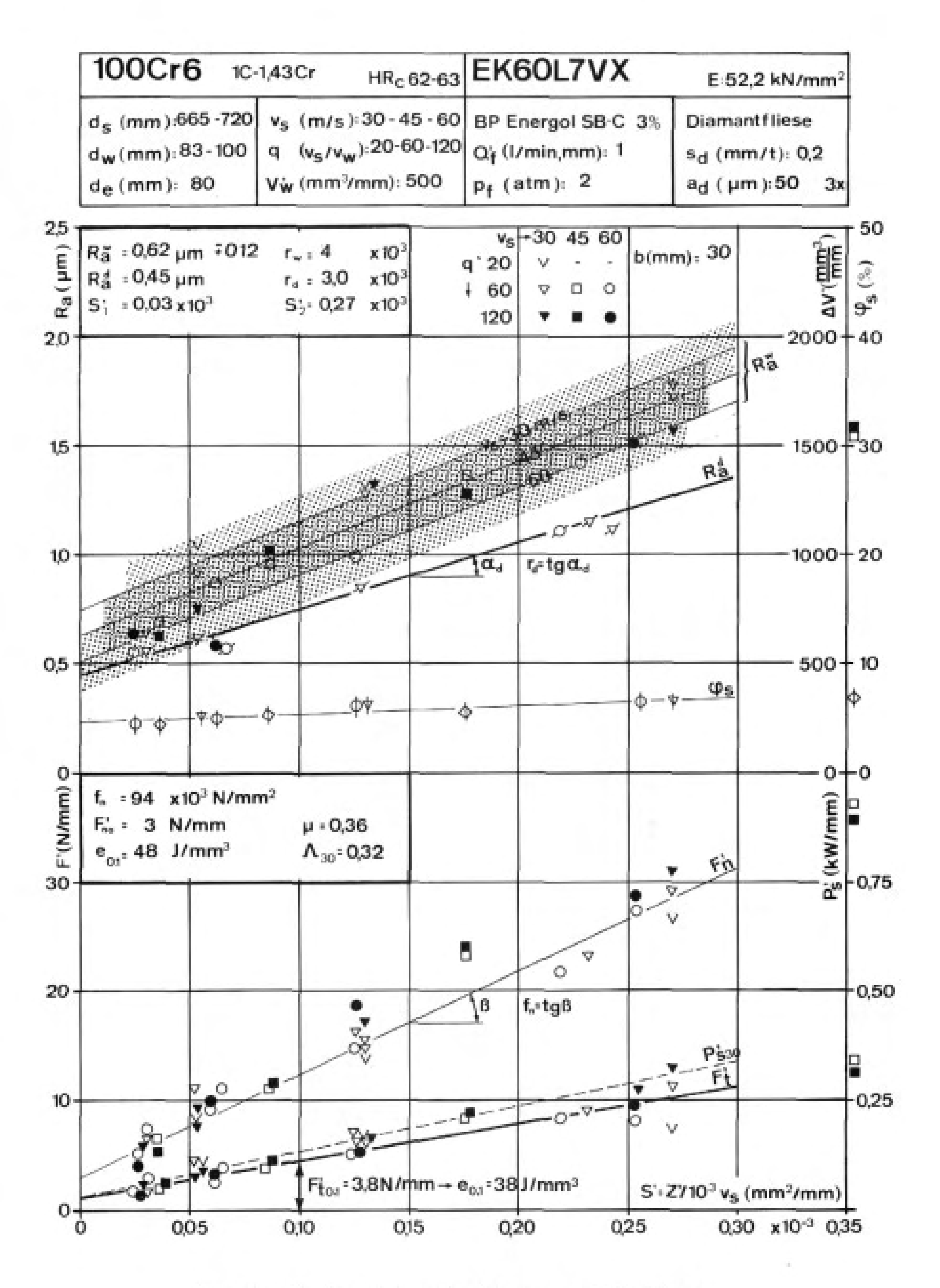


Fig.12 - Carte d'usinabilité en rectification

Il est intéressant de remarquer que :

1) Pour des valeurs de S' s'étendant de 0,03 10^{-3} (finition) à 0,27 10^{-3} mm^2/mm (ébauche), on peut valablement représenter l'évolution des efforts de coupe et des finis de surface par des droites.
En conséquence de quoi, deux valeurs de consigne suffisent pour caractériser chacune d'elles. Ces valeurs sont données sur le graphique.
Pour d'autres renseignements, voir réf.(6).

2) Un paramètre physique de toute première importance pour caractériser la qualité de coupe d'une meule est l'énergie spécifique e ; c'est l'énergie nécessaire à enlever une unité de volume de matériau ; elle peut immédiatement se lire sur le graphique. En effet,

$$\text{l'énergie spécifique } e = \frac{P'_s}{Z'} = \frac{F'_t}{Z'/v_s} = \frac{F'_t}{10^3 S'}$$

Donc pour $S' = 0{,}1 \times 10^{-3}$ mm^2/mm, l'énergie spécifique $e_{0,1}$ (J/mm^3) vaut dix fois l'effort tangentiel $F'_{t0,1}$ (N/mm) lu sur le graphique.
La figure 12 montre que $F'_{t0,1} = 4{,}8$ N/mm, l'énergie spécifique $e_{0,1}$ sera donc 48 J/mm^3.

3) Si l'on compare d'une façon analogue l'énergie spécifique requise pour la meule J, on constatera que celle-ci vaut 38 J/mm^3 (figure 11).
Supposons qu'un utilisateur voulant utiliser une meule de dureté E = 45 kN/mm^2 utilise une meule E = 52,2 kN/mm^2. Ainsi qu'il l'a été dit à l'introduction, de tels écarts sur le grade nominal ne sont pas rares. Cette méprise aurait pour conséquence que les efforts tangentiels et normaux et la puissance nécessaire seraient accrus de 26 % environ. Dans le cas où la puissance disponible est limitée, il va falloir réduire le débit de copeaux, ce qui se traduira par une perte de temps et finalement de rendement.

Si au contraire, la puissance disponible ne constitue pas une limite, le temps de rectification pourra rester le même, mais des échauffements locaux pourront déclasser la pièce (microfissures, tensions superficielles, brûlures, etc...)

Cet exemple met en évidence toute l'importance qu'il faut accorder au contrôle de la dureté de meule.

4. CONCLUSIONS

1. Le système GRINDO-SONIC permet d'effectuer un contrôle rapide, non-destructif et efficace, ce qui a rendu possible le contrôle à 100 % de séries importantes de meules.

2. Il permet au constructeur de surveiller la constance de la qualité des meules qu'il produit et à l'utilisateur de vérifier si la dureté de sa meule correspond véritablement à la dureté désirée (contrôle de réception).

3. L'étude a montré par un exemple concret que l'omission du contrôle de dureté peut se traduire par une perte de rendement ou encore par une mauvaise qualité de pièce.

5. ANNEXE

1. Formules pour calculer le module d'élasticité (E) à partir de la lecture au GRINDO-SONIC (R)

	en fonction du poids total		en fonction du poids spécifique
disques	$E = \frac{mM}{bR^2}$	$3,30 \leq \frac{D}{b} \leq 25$	$E = \frac{P\rho D^2}{R^2}$
	$E = \frac{mMD^2}{b^3R^2}$	$\frac{D}{b} > 25$	$E = \frac{P\rho D^4}{b^2R^2}$
barreaux	$E = \frac{mM}{bR^2}$	$3 < \frac{l}{h} \leq 24$	$E = \frac{P\rho l^2}{R^2}$
	$E = 3,97 \times 10^3 \frac{ml^3}{bh^3R^2}$	$\frac{l}{h} > 24$	$E = 3,97 \frac{\rho l^4}{h^2R^2}$

avec m = masse totale (g)

M = facteur de forme (cfr. annexe 2)

ρ = masse volumique (g/cm^3)

P = facteur de forme (cfr. annexe 2)

E = module d'élasticité (kN/mm^2)

D = diamètre extérieur du disque (mm)

b = épaisseur du disque ou largeur du barreau (mm)

h = hauteur du barreau (mm)

l = longueur du barreau (mm)

R = lecture au GRINDO-SONIC

N.B. Ces formules ont été consignées sur une règle à calcul spécialement conçue pour le calcul de E.

2. L'emploi des tables de facteurs de forme peut être évité en stockant les coefficients M et P sur ordinateur

2.1. Disques

Les formules sont données en fonction des rapports θ = b/D, avec b = épaisseur du disque, D = diamètre extérieur, δ = d/D avec d = l'alésage.

2.1.1. Disques épais $(3,30 \leqslant \frac{D}{b} \leqslant 25)$

a) $P(\theta,\delta) = \dfrac{2392 \times 10^6}{f^2}$

avec $f(\theta,\delta) = 10^3(25,7\theta - 85,75\theta^3 + 268,3\theta^5 - 26,2\theta\delta^2 - 16,15\theta^3\delta^2 - 425,8\theta^5\delta^2 + 29,08\theta\delta^4 + 2526\theta^5\delta^4 - 18,22\theta\delta^6 - 278,4\theta^3\delta^6)$

b) $M(\theta,\delta) = \dfrac{4P \times 10^3}{\pi(1 - \delta^2)}$

2.1.2. Disques minces

a) $P(\delta) = \dfrac{2392 \times 10^6}{f^2}$

avec $f(\delta) = 10^3(25,56 - 26,22\delta^2 + 29,08\delta^4 - 18,69\delta^6)$

b) $M(\delta) = \dfrac{4P \times 10^3}{\pi(1 - \delta^2)}$

2.2. Barreaux épais

$(3 < l/h \leqslant 24$, avec l = longueur et h = hauteur du barreau)

a) $P(\frac{l}{h}) = 4,86\ [4,66 + 0,81\ (\frac{l}{h})^2]$

b) $M(\frac{l}{h}) = 4,86\ 10^3\ [4,66\ \frac{l}{h} + 0,81\ (\frac{l}{h})^3]$

Le calcul d'un barreau mince n'exige pas de facteur de forme (voir annexe 1).

6. BIBLIOGRAPHIE

(1) J.Peters, R.Snoeys — "The E-modulus a suitable characteristic of grinding wheels"
Publication CRIF MC 9 - août 1965

(2) J.W.Lemmens — "Manuel d'Instructions pour le GRINDO-SONIC MK3"

(3) A.Decneut, R.Snoeys, J.Peters — "Sonic testing of grinding wheels"
Publication CRIF MC 36 - novembre 1970

(4) A.Decneut — "New formulas improve E-modulus calculations"
Publication CRIF MC 37 - novembre 1970

(5) A.Decneut — "Tables for simplified calculation of Young's modulus of elasticity, based on natural frequency measurements"
Publication CRIF - août 1971

(6) A.Decneut — "Richtwaarden voor slijpkrachten en oppervlakteruwheid bij het cylindrisch insteekslijpen"
Publication CRIF MC 46 - octobre 1972

NOTE TECHNIQUE 9

CONTROLE RAPIDE DE LA DURETE DES MEULES

ERRATUM

Page 14 en bas du diagramme

lire "$F'_{t0,1} = 4,8$ N/mm $\longrightarrow e_{0,1} = 48$ J/mm^3" au lieu de

"$F'_{t0,1} = 3,8$ N/mm $\longrightarrow e_{0,1} = 38$ J/mm^3"